第46卷 第9期
2023年9月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 9
Sep. 2023

基于STIRPAT模型的甘肃省农业碳排放特征分析

杨思存， 霍 琳， 王成宝， 温美娟

（甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所/国家农业科学白银观测实验站，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 从种植业和畜牧业两方面入手，采用排放因子法对甘肃省2000—2020年农业碳排放进行了估算，分析了其时空变化特征，基于STIRPAT（Stochastic impacts by regression on PAT）模型探析了甘肃省农业碳排放的影响因素，并提出了相应对策。结果表明：（1）甘肃省2000—2020年CO_2-e排放量呈“升高-降低-升高”的趋势，2015年达到峰值，估算为2320.41×10^4 t；从2018年开始又逐年增加，直至2020年增至2290.69×10^4 t。（2）甘肃省农业CO_2-e排放结构中，种植业占35%，畜牧业占65%。主要碳排放源中，畜禽胃肠道发酵对农业碳排放总量的贡献最大，其次是化肥和畜禽粪便管理。主要畜禽中，肉牛养殖对碳排放的贡献最大，其次是绵羊、山羊、奶牛和猪，家禽养殖的贡献最小。（3）农村人口、农村居民人均GDP、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、农业增加值占全省生产总值比重、农村住户固定资产投资额、农业科技成果应用数量、农业科技投入是影响甘肃省农业碳排放的主要因素，影响力指数分别为−0.017、0.026、0.020、0.038、−0.025、0.031、−0.017、0.016。为有效控制农业碳排放，建议在5个方面采取相应策略：努力提高种植业资源利用效率和土壤碳汇能力；强化畜牧业源头减量、过程控制和末端处理；努力降低农业机械对石油的依赖；有效推动农村清洁能源利用；加大农业低碳技术的研发与应用。

关 键 词： 农业碳排放；STIRPAT模型；种植业；畜牧业；甘肃省

文章编号： 1000-6060(2023)09-1493-10(1493~1502)

我国高度重视由温室气体排放所引起的气候变化问题，将其摆在国家治理的突出位置[1]，并向世界承诺“2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和”[2]。虽然农业碳排放在我国温室气体排放总量中只占16%~17%[3]，但所拥有的减排潜力以及对化石燃料碳排放的抵消作用却不容忽视。目前普遍认为，种植业碳排放主要集中在化肥、农药、农膜、稻田、灌溉以及机械动力方面[4-5]，畜牧业碳排放则主要包括反刍动物胃肠道发酵产生的甲烷（CH_4）和畜禽粪便管理过程产生的氧化亚氮（N_2O）[6]，其产生的CH_4和N_2O约占农业非CO_2温室气体排放量的80%[7]。因此，控制农业碳排放、发展低碳农业是我国实现“碳达峰、碳中和”的重要任务之一。

我国在农业碳排放方面的研究起步较晚，但近年来发展迅猛，文献量远超国外，主要集中于农业碳排放核算、影响因素及减排机制等方面[8-14]。甘肃省是我国西部地区重要的生态屏障，在应对全球气候变化和实现“碳达峰、碳中和”中发挥着极其重要的作用。但甘肃省毕竟是西部不发达省份，2020年的粮食总产量、畜禽肉类总产量分别只占全国总量的1.80%、1.42%[15]，有关农业碳排放方面的研究也比较少。本文选择国际主流的排放因子法来估算碳排放[16]，依照联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change，IPCC）发布的《2006年国家温室气体清单编制指南报告》[17-18]，对各排放源以活动水平和排放因子的乘积来估算其碳排放量。同时，选用STIRPAT（Stochastic impacts by regression on PAT）模型[19]，分析了

收稿日期： 2022-12-08； **修订日期：** 2023-03-11
基金项目： 甘肃省重点研发计划项目（22YF7NA038）；农业部公益性行业（农业）科研专项（201503117）；甘肃省青年科技基金计划（21JR7RA724）资助
作者简介： 杨思存（1971-），男，学士，研究员，主要从事土壤养分资源管理研究. E-mail: yangsicun@sina.com

农村人口、人均GDP、人均可支配收入、农业机械总动力、农业科技成果应用数量、农业科技投入等因素对农业碳排放的影响程度,旨在为甘肃省农业碳减排提供量化参考,并为低碳农业的发展提供科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

甘肃省(32°11′~42°57′N,92°13′~108°46′E)地处黄土高原、青藏高原和内蒙古高原的交汇处,东接陕西,南邻四川,西连青海、新疆,北靠内蒙古、宁夏并与蒙古国接壤;东西长1655 km,南北宽530 km,总面积45.44×10⁴ km²,居全国第7位;境内山地、高原、平川、河谷、沙漠、戈壁交错分布,地貌形态复杂,形成陇南山地、陇东陇中黄土高原、甘南高原、河西走廊、祁连山地、北山山地6个各具特色的地形区域,是我国西部地区重要的生态屏障。甘肃省辖12个地级市、2个自治州,86个县(市、区),常住人口2502×10⁴人。全省各地气候类型多样,从南向北包括了亚热带季风气候、温带季风气候、温带大陆性(干旱)气候和高原高寒气候4个类型,年均气温0~15 ℃,年均降水量40~750 mm,干旱半干旱区占总面积的75%。种植作物主要有小麦、玉米、马铃薯、果树、蔬菜、中药材、小杂粮等,目前已形成"牛羊菜果薯药"六大特色产业。国家统计局数据显示,2020年甘肃省耕地面积537.7×10⁴ hm²,约占全国耕地面积的3.83%;粮食总产量1202.2×10⁴ t,占全国总量的1.80%;畜禽肉类总产量110.2×10⁴ t,占全国总量的1.42%;农业总产值1423.8×10⁸元,占全国总产值的1.98%,位列全国第22位。

1.2 数据来源

2000—2020年各年份化肥、农药、农膜、农用柴油用量、农村用电量、牲畜年底存栏量、农作物播种面积、农村人口、农民人均可支配收入、农业机械总动力、农业科技成果应用数量等数据主要来自历年《中国统计年鉴》《中国农村统计年鉴》和《甘肃省统计年鉴》。其中,化肥施用量采用折纯量表示,农药、农膜、农用柴油采用实际使用量表示。

1.3 研究方法

1.3.1 ***农业碳排放估算方法*** 本文采用排放因子法,按照《国家温室气体清单指南》和《省级温室气体清单编制指南》的推荐值估算甘肃省农业碳排放量。碳源因子及相应碳排放系数的选取借鉴了邱子健等[6]的研究成果:(1) 种植业碳排放包括化肥、农药、农膜生产运输过程中的碳排放,农村用电、农业机械使用过程中消耗农用柴油导致的碳排放,以及农用地施用氮肥导致的N_2O排放;(2) 畜牧业碳排放包括畜禽胃肠道发酵导致的CH_4排放和畜禽粪便管理过程中产生的CH_4、N_2O排放。其中:化肥、农药、农膜已换算成CO_2排放系数,CH_4、N_2O需按照IPCC第五次评估报告中百年尺度CO_2增温潜势的28倍、265倍换算成CO_2-e估算。估算模型如下:

$$I=\sum I_i=\sum(AD_i\times EF_i) \tag{1}$$

式中:I为农业的CO_2-e排放总量(10⁴ t);I_i为第i类温室气体排放源的CO_2-e排放量(10⁴ t);AD_i为第i类温室气体排放源的活动水平;EF_i为第i类温室气体排放源的CO_2-e排放系数。

1.3.2 ***农业碳排放趋势预测模型*** 参考Ehrlich等[20]、张乐勤等[21]、邱子健等[6]模型的构建方法,采用STIRPAT模型[22],从人口规模、富裕程度、技术应用3个方面考虑,以甘肃省农村人口(P,10⁴人)、农村居民人均GDP(A,元·人⁻¹)、农村居民人均可支配收入(R,元·人⁻¹)、农业机械总动力(T,10⁸ W)、农业增加值占全省生产总值比重(V,%)、农村住户固定资产投资额(C,10⁸元)、农业科技成果应用数量(N,项)、农业科技投入(S,10⁸元)为影响因素,以2000—2020年的农业碳排放量为因变量,对农业的CO_2-e排放总量(I,10⁴ t)进行了预测。其基本模型为:

$$I=aP^b\times A^c\times R^d\times T^f\times V^g\times C^h\times N^k\times S^m\times e \tag{2}$$

将式(2)中等式两边经对数化处理后得到求和模式:

$$\ln I=\ln a+b\ln P+c\ln A+d\ln R+f\ln T+g\ln V+h\ln C+k\ln N+m\ln S+\ln e \tag{3}$$

式中:a为常数;b、c、d、f、g、h、k、m分别为各影响因素的弹性指数;e为误差。

2 结果与分析

2.1 农业碳排放特征

2.1.1 ***种植业碳排放特征*** 2000—2020年,甘肃省种植业CO_2-e排放量总体呈"升高-降低"的变化趋势,并在2015年达到峰值,为935.79×10⁴ t(图1)。甘肃省旱地面积占75%以上,2015年之前,随着制

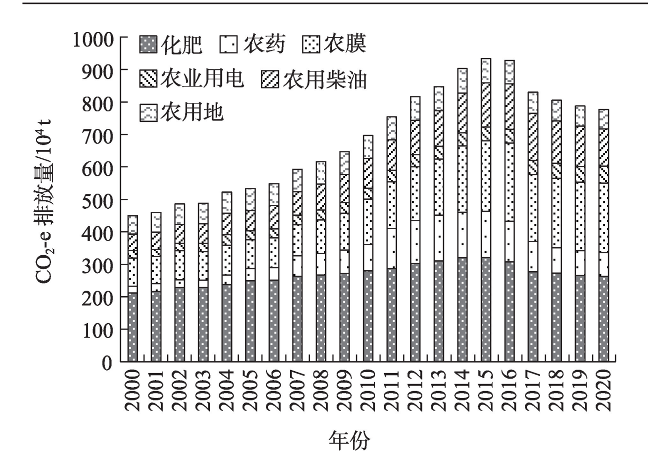


图1　2000—2020年甘肃省种植业碳排放量变化

Fig. 1　CO_2-e emission change of planting industry in Gansu Province from 2000 to 2020

种玉米、高原夏菜、早熟马铃薯等特色优势产业的发展，在极大提高全省粮食、蔬菜产量的同时，也使得化肥、农药、农膜、农业用电、农用柴油的CO_2-e排放量快速上升；与2000年相比，2015年的CO_2-e排放量分别增加了52%、591%、149%、84%和174%。而同期的农用地面积虽然也有增加，但CO_2-e排放量只增加了34%。2015年以后，随着国家化肥农药双减、废旧农膜回收利用等一系列政策措施的相继出台和实施，化肥、农药、农膜的用量大幅度下降，种植业的CO_2-e排放量也开始下降，2020年已降至778.72×10^4 t，比2015年减少了16.8%。

从甘肃省种植业的碳排放结构来看，化肥的贡献最大，平均为40.2%，但所占的比例一直呈下降趋势，从2000年的47.2%降至2020年的33.9%。第二是农膜的贡献，平均为20.6%，2000—2007年一直呈下降趋势，从19.4%降至16.1%；2008—2020年一直呈增加趋势，从16.8%增至27.5%。第三是农用柴油、农药、农用地的贡献，平均分别为13.4%、10.3%和10.3%，其中农用柴油的贡献在2017年以前一直呈增加趋势，从11.1%增至17.4%，2017年之后逐年下降，2020年降至14.8%；农药的贡献在2015年以前一直呈增加趋势，从4.6%增至16.6%，2015年之后逐年下降，2020年降至9.4%；农用地N_2O排放以氮肥施用的直接排放居多，其贡献率一直呈下降趋势，从2000年的12.5%降至2020年的7.8%。第四是农业用电的贡献，平均为5.1%，一直呈锯齿形波动，但幅度不大，2016年最低为4.5%，2020年最高为6.7%，近年来有增加的趋势。

2.1.2　畜牧业碳排放特征　2000—2020年，甘肃省畜牧业CO_2-e排放量总体呈增加的趋势，2000年只有986.79×10^4 t，2020年增至1509.77×10^4 t，增加了53.0%，虽然2007、2015、2016、2017年等年份相比上一年度有所降低，但总体上还是增加的(图2)。尤其是2019年，受猪瘟疫情影响，全国生猪出栏数和存栏数都明显降低，减少了CO_2-e排放量，甘肃省也不例外，但对于甘肃省而言，牛、羊才是主导产业，且存栏数持续增加，因此并未改变CO_2-e排放量持续增加的大趋势。

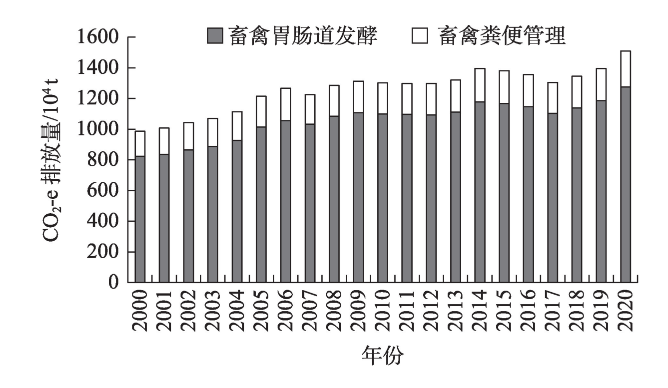


图2　2000—2020年甘肃省畜牧业碳排放量变化

Fig. 2　CO_2-e emission change of animal husbandry in Gansu Province from 2000 to 2020

从甘肃省畜牧业的碳排放结构来看，畜禽胃肠道发酵的贡献最大，占到83.0%~85.1%，平均为84.0%；畜禽粪便管理的贡献率占到了14.9%~17.0%，平均为16.0%。这主要是因为在甘肃省的畜牧业中，草地畜牧业占了绝大多数，而传统圈舍养殖所占比重并不大，造成粪便管理困难。

从不同畜禽种类的碳排放(图3)来看，在畜禽胃肠道发酵碳排放中，肉牛的贡献最大，占52.4%~58.1%，平均为55.0%，一直呈下降趋势。其次是绵羊，占23.9%~31.1%，平均为27.9%，一直呈增加趋势。山羊和奶牛的贡献相对较小，平均分别只占8.7%和6.8%，均呈持续下降趋势。猪和家禽由于不是反刍动物，通过胃肠道发酵碳排放并不多，猪只占1.6%，家禽更是可以忽略不计。在畜禽粪便管理碳排放中(图4)，依然是肉牛的贡献最大，占37.2%~40.3%，平均为38.5%，呈缓慢增加趋势。第二是猪，占20.8%~31.9%，平均为26.9%，一直呈下降趋势。第三是绵羊，占14.0%~20.5%，平均为17.6%，一直

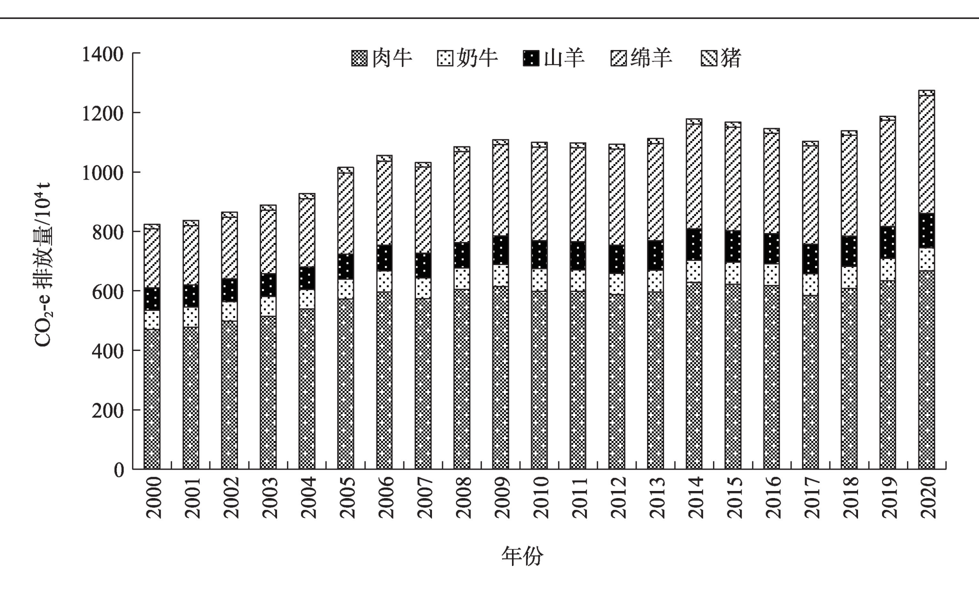


图3 2000—2020年甘肃省畜禽胃肠道发酵碳排放量变化

Fig. 3 CO_2-e emission change of gastrointestinal fermentation of livestock in Gansu Province from 2000 to 2020

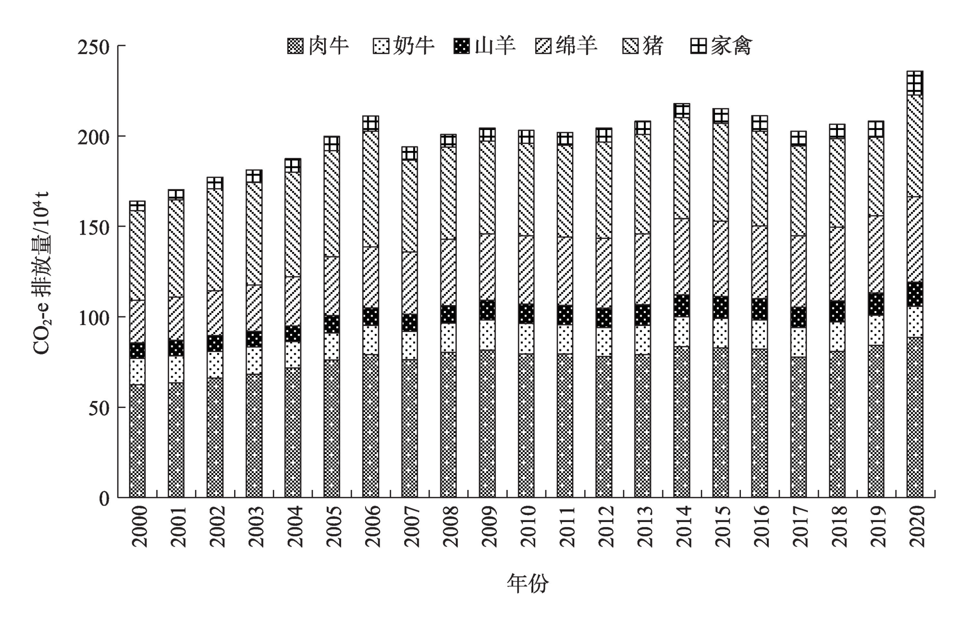


图4 2000—2020年甘肃省畜禽粪便管理碳排放量变化

Fig. 4 CO_2-e emission change of livestock manure management in Gansu Province from 2000 to 2020

呈增加趋势。第四是奶牛，占7.3%~8.9%，平均为8.0%，呈下降趋势。山羊和家禽对碳排放的贡献最小，平均只占5.2%和3.8%，均呈持续增加的趋势。

2.1.3 *农业碳排放特征* 2000—2020年，甘肃省农业CO_2-e排放量总体呈"升高-降低-升高"的变化趋势，2000年最低，只有1435.66×10^4 t，2015年达到峰值，为2317.49×10^4 t；2016年略有降低，2017年降至近5 a来的最低，为2137.35×10^4 t；从2018年开始又逐年增加，直至2020年增至2288.49×10^4 t（图5）。从农业碳排放量的增长率来看，2000—2020年的年平均增长率为2.4%，2015年与2000年相比增加了61.4%，2017年与2015年相比降低了7.8%，2020年与2017年相比增加了7.1%。

从甘肃省农业碳排放结构（表1）来看，畜禽胃肠道发酵对农业CO_2-e排放总量的贡献最大，占到了54.7%。其次是化肥、畜禽粪便管理和农膜，分别贡献了13.9%、10.4%和7.3%。此外，农用柴油、农药、农用地和农业用电的贡献相对较低，分别为4.7%、3.7%、3.5%和1.8%。总体来看，畜牧业碳排放占到了65.0%，远远高于种植业平均35.0%的碳排

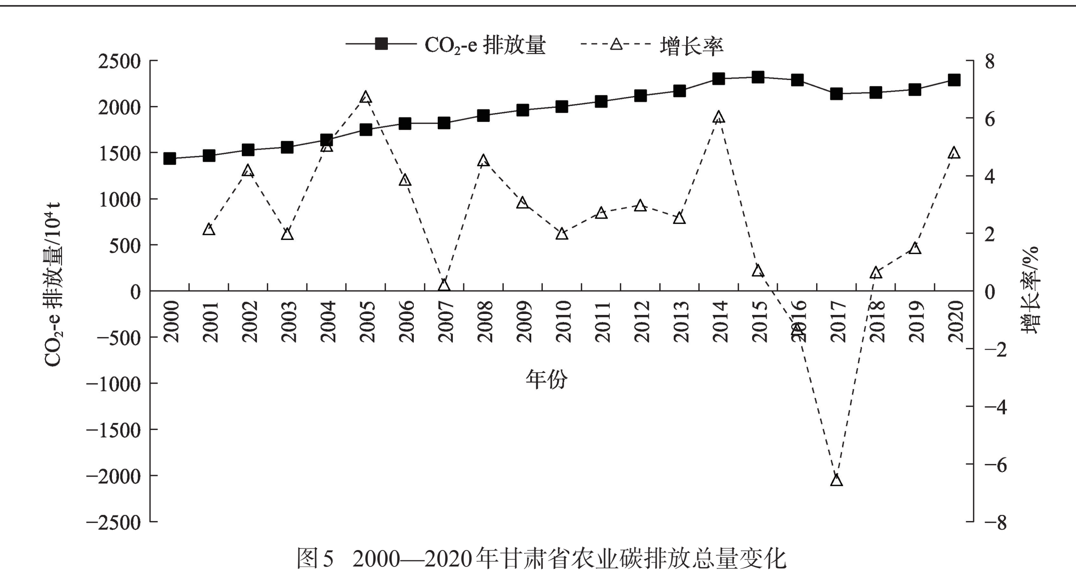


图5 2000—2020年甘肃省农业碳排放总量变化

Fig. 5 Change of total agricultural CO_2-e emission in Gansu Province from 2000 to 2020

表1 2000—2020年甘肃省农业碳排放结构变化

Tab. 1 Structural change of agricultural carbon emission sources in Gansu Province from 2000 to 2020 /%

年份	种植业						畜牧业	
	化肥	农药	农膜	农业用电	农用柴油	农用地	畜禽胃肠道发酵	畜禽粪便管理
2000	14.8	1.4	6.1	1.6	3.5	3.9	57.1	11.4
2001	14.8	1.6	5.8	1.5	3.6	4.1	56.8	11.6
2002	14.9	1.6	5.9	1.5	3.8	4.1	56.4	11.6
2003	14.6	1.5	5.7	1.6	3.9	4.0	56.9	11.6
2004	14.5	1.8	5.6	2.0	4.0	4.0	56.5	11.4
2005	14.3	2.2	5.1	1.5	3.6	3.8	57.9	11.4
2006	13.8	2.2	5.1	1.5	4.0	3.7	58.0	11.6
2007	14.5	3.5	5.2	1.6	4.0	3.9	56.6	10.6
2008	14.1	3.5	5.5	1.6	4.2	3.7	56.9	10.5
2009	13.9	3.7	5.8	1.6	4.5	3.6	56.4	10.4
2010	14.0	4.0	7.0	1.7	4.6	3.5	54.8	10.1
2011	14.0	6.0	7.0	1.7	4.6	3.4	53.3	9.8
2012	14.3	6.3	7.8	1.8	5.0	3.5	51.6	9.6
2013	14.3	6.5	8.0	1.8	5.1	3.4	51.2	9.6
2014	13.9	6.1	8.9	1.8	5.3	3.3	51.1	9.5
2015	13.9	6.2	9.4	1.8	5.9	3.3	50.3	9.3
2016	13.4	5.5	10.5	1.9	6.2	3.2	50.0	9.2
2017	13.0	4.4	9.6	2.1	6.8	3.1	51.5	9.5
2018	12.7	3.6	10.0	2.2	6.0	3.0	52.8	9.6
2019	12.2	3.5	9.7	2.2	5.7	2.8	54.3	9.5
2020	11.5	3.2	9.4	2.3	5.0	2.6	55.6	10.3
平均	13.9	3.7	7.3	1.8	4.7	3.5	54.7	10.4

放。值得关注的是，化肥、农用地和畜禽粪便管理对农业碳排放的贡献一直在降低；农药、农膜、农用柴油的贡献都是先增加，到2015年前后达到峰值后再持续降低；农业用电的贡献在持续增加；畜禽胃肠道发酵的贡献是先降低，到2016年达到谷底后又持续增加，是甘肃省农业碳排放的主要来源。因此，减少畜禽胃肠道发酵碳排放任重而道远。

2.2 农业碳排放影响因素分析

2.2.1 *偏相关分析* 将影响甘肃省农业碳排放的8个因素按时间序列数据进行偏相关分析，农村人口、农村居民人均GDP、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、农业增加值占全省生产总值比

重、农村住户固定资产投资额、农业科技成果应用数量、农业科技投入与农业碳排放量的偏相关系数分别为-0.903、0.919、0.843、0.948、-0.888、0.954、0.653、0.839。显著性(双侧)检验概率均在1%以下,说明农村居民人均GDP、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、农村住户固定资产投资额、农业科技成果应用数量、农业科技投入分别与农业碳排放量呈显著正相关,农村人口、农业增加值占全省生产总值比重与农业碳排放量呈显著负相关。

2.2.2 模型构建 将原始数据做自然对数变换后,作为原始变量,运用SPSS 25.0进行标准化处理以消除量纲影响,分别以ZI、ZP、ZA、ZR、ZT、ZV、ZC、ZN、ZS表示农业碳排放量、农村人口、农村居民人均GDP、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、农业增加值占全省生产总值比重、农村住户固定资产投资额、农业科技成果应用数量、农业科技投入经标准化处理后的变量。利用主成分法对ZI、ZP、ZA、ZR、ZT、ZV、ZC、ZN、ZS进一步做降维处理,提取出FAC_1、FAC_2、FAC_3 3个综合变量,能够解释原始变量的96.971%(表2),且显著性检验值均小于0.01,表明拟合效果好。同时得到FAC_1、FAC_2、FAC_3与原始变量间的关系为:

$$FAC_1 = -0.839ZP + 0.180ZA + 0.376ZR + 0.607ZT + 0.841ZV + 0.220ZC - 0.536ZN - 0.258ZS \quad (4)$$

$$FAC_2 = 0.956ZP + 0.110ZA - 0.311ZR - 0.066ZT - 1.352ZV + 0.211ZC - 0.129ZN + 0.378ZS \quad (5)$$

$$FAC_3 = -0.204ZP - 0.075ZA + 0.120ZR - 0.460ZT + 0.107ZV - 0.243ZC + 1.056ZN + 0.196ZS \quad (6)$$

以ZI为因变量,将综合变量FAC_1、FAC_2、FAC_3作为其解释变量,利用SPSS 25.0作二阶最小二乘法回归分析,得到综合变量与因变量ZI的方程,如下:

$$ZI = 7.106 + 0.112FAC_1 + 0.092FAC_2 + 0.052FAC_3 \quad (7)$$

$$R^2 = 0.961,\ F = 141.107,\ P < 0.001$$

从相关系数平方和、方差分析的F值和t检验的P值可以看出,模型拟合效果非常好,将式(7)进行转换,得到2000—2020年甘肃省农业碳排放的影响因素模型式:

$$\ln I = 7.106 - 0.017\ln P + 0.026\ln A + 0.020\ln R + 0.038\ln T - 0.025\ln V + 0.031\ln C - 0.017\ln N + 0.016\ln S \quad (8)$$

结合式(2),将式(8)进一步变换为式(9):

$$I = e^{7.106} \times P^{-0.017} \times A^{0.026} \times R^{0.020} \times T^{0.038} \times V^{-0.025} \times C^{0.031} \times N^{-0.017} \times S^{0.016} \quad (9)$$

式(9)即为甘肃省农业碳排放的多变量非线性STIRPAT模型。将模型拟合得到的结果与估算值比较(图6),拟合值与估算值变化趋势总体近似,可以较好地反映未来碳排放趋势。

由式(9)也可以看出,农村人口、农村居民人均GDP、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、农业增加值占全省生产总值比重、农村住户固定资产投资额、农业科技成果应用数量、农业科技投入的影响力指数分别为-0.017、0.026、0.020、0.038、-0.025、0.031、-0.017、0.016,其现实意义为:甘肃省农村人口如果减少1%,相应农业碳排放量将会减少0.017%。同理,农村居民人均GDP每增加1%,相应农业碳排放量将会增加0.026%;农村居民人均可支配收入每增加1%,相应农业碳排放量将会增加0.020%;农业机械总动力每增加1%,相应农业碳排

表2 主成分分析解释的总方差

Tab. 2 Total variance explained with principal component analysis

主成分	初始特征值			提取平方和载入			旋转平方和载入		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
1	7.042	88.028	88.028	7.042	88.028	88.028	3.247	40.589	40.589
2	0.507	6.337	94.365	0.507	6.337	94.365	2.303	28.793	69.381
3	0.208	2.606	96.971	0.208	2.606	96.971	2.207	27.590	96.971
4	0.128	1.604	98.575	–	–	–	–	–	–
5	0.063	0.790	99.366	–	–	–	–	–	–
6	0.035	0.438	99.803	–	–	–	–	–	–
7	0.012	0.148	99.951	–	–	–	–	–	–
8	0.004	0.049	100.000	–	–	–	–	–	–

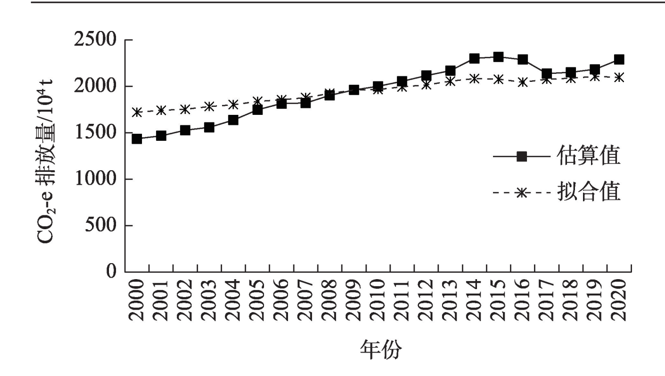


图6　STIRPAT模型模拟的2000—2020年甘肃省农业碳排放量

Fig. 6　Agricultural CO_2-e emissions simulated by STIRPAT model in Gansu Province from 2000to 2020

放量将会增加0.038%；农业增加值占全省生产总值比重每减少1%，相应农业碳排放量将会减少0.025%；农村住户固定资产投资额每增加1%，相应农业碳排放量将会增加0.031%；农业科技成果应用数量每减少1%，相应农业碳排放量将会减少0.017%；农业科技投入每增加1%，相应农业碳排放量将会增加0.016%。

3　讨　论

2000—2020年，甘肃省农业 CO_2-e 排放量总体呈"升高-降低-升高"的趋势，这与"十三五"期间国家相继出台的"化肥农药双减""草原禁牧"等政策有关，在种植业实现"化肥农药零增长"、畜牧业逐步推进"草畜平衡"背景下，CO_2-e 排放量在2015年达到峰值，并在2016、2017年持续下降。但面对非常艰巨的脱贫攻坚任务，甘肃省必须发展特色优势产业以增加农民收入，尤其是牛羊产业的不断发展壮大，在加快脱贫攻坚步伐的同时，也增加了 CO_2-e 排放量，使得2018—2020年农业 CO_2-e 排放量呈现出缓慢增长趋势。但对于种植业而言，由于管控措施落实到位，从2015年开始，CO_2-e 排放量一直呈下降趋势，这与张小平、夏文浩、黄晓慧等[5,14,23]的测算结果一致。

在甘肃省农业碳排放结构中，种植业只占35%，这符合甘肃省实际，毕竟甘肃省旱地面积占到了75%以上，作物产量低，农用物资投入就少，CO_2-e 排放量也相对较少。但不容忽视的是化肥、农膜碳排放占到了排放总量的13.9%和7.3%，是种植业 CO_2-e 排放的大户，这与田云、邱子健、胡婉玲等[3,6,24]的研究结果一致，好在它们都有逐年下降的趋势，如果能加强管控措施和替代技术的应用，将成为减少种植业 CO_2-e 排放的突破口。畜牧业碳排放量占到了总排放量的65%，这是因为甘肃有得天独厚的草地畜牧业优势，农区养殖业也在蓬勃发展。《甘肃省"十四五"推进农业农村现代化规划》提出，力争到2025年全省肉牛、肉羊存栏量分别达到600×10⁴头和3300×10⁴只，分别比2020年增长33.2%和50.6%，这意味着畜牧业 CO_2-e 排放量占农业碳排放总量的比重将进一步增加。需要重视的是，在畜牧业碳排放结构中，通过牛、羊等反刍动物胃肠道发酵碳(CH_4)排放占到了84%，这也是本研究中畜牧业 CO_2-e 排放量远远高于种植业的原因之一。另外，通过畜禽粪便管理碳(N_2O)排放在甘肃省农业碳排放结构中排在了第3位，是根据畜禽养殖量和各自排放系数估算的，并未考虑草地畜牧业中牛羊粪便对草地的回馈和农区畜牧业中养殖场粪便管理水平的提升，有可能高估了畜禽粪便管理对碳排放的贡献，但具体应该如何精准估算，尚未找到更好的方法。

本文选取农村人口、人均GDP、人均可支配收入、农业机械总动力、农业科技成果应用数量、农业科技投入等8个与农业碳排放密切相关的参数来建立模型，包含了人口规模、富裕程度、技术应用3个方面，符合STIRPAT建模型要素条件。相关分析表明，8个参数与农业碳排放量之间都有显著相关性，利用模型得到的拟合值与估算值总体相近，能较为准确地反映甘肃省农业碳排放的时序特征。但所建模型各因素的影响力指数分别只有-0.017、0.026、0.020、0.038、-0.025、0.031、-0.017、0.016，总体偏小，对 CO_2-e 排放量的影响也就小，可能是因为所选参数对农业碳排放量的影响都是间接的，不像化肥、农药、农膜、畜禽胃肠发酵等都是直接影响的。也有可能是所选指标与农业碳排放之间有脱钩效应，从而造成影响力指数小，这已经被许多学者所证实[12,25-27]。随着甘肃省经济的发展、农业科技的进步、温室气体减排措施的完善和农业生产效率的提高，这种脱钩效应将会越来越强。另外，按照该模型预测，今后5~10 a内，随着"牛羊菜果薯药"六大特色产业的发展，甘肃省农业碳排放仍将呈现缓慢增长的趋势，这也符合甘肃省实际。但随着农村城镇化进程加快，农业现代化逐步实现，农业低

碳技术、面源污染防控技术、化肥农药减施增效技术不断应用，这种增加将变得越来越缓慢，直至达到一个平衡状态，甚至出现缓慢下降。

4 结论与建议

4.1 结论

（1）2000—2020年，甘肃省农业碳排放量总体呈“升高-降低-升高”的变化趋势，2015年达到峰值，为2320.41×10^4 t；从2018年开始又逐年增加，直至2020年增至2290.69×10^4 t。

（2）甘肃省农业碳排放结构中，种植业占35%，畜牧业占65%；主要碳排放源中，畜禽胃肠道发酵对农业碳排放总量的贡献最大，其次是化肥生命周期隐含碳和畜禽粪便管理；主要畜禽中，肉牛养殖对农业碳排放的贡献最大，其次是绵羊、山羊、奶牛和猪，家禽养殖的贡献最小。

（3）农村人口、农村居民人均GDP、农村居民人均可支配收入、农业机械总动力、农业增加值占全省生产总值比重、农村住户固定资产投资额、农业科技成果应用数量、农业科技投入与农业碳排放量之间都有显著相关性，利用STIRPAT模型得到的拟合值与估算值总体相近，能较为准确地反映甘肃省农业碳排放的时序特征，但影响力指数总体偏小，分别只有-0.017、0.026、0.020、0.038、-0.025、0.031、-0.017、0.016。

4.2 建议

为有效降低农业碳排放，助力国家“碳达峰、碳中和”目标的实现，甘肃省应该结合自身经济发展水平、乡村振兴战略总体要求和农业现代化发展趋势，从以下5个方面采取对策：

（1）努力提高种植业资源利用效率和土壤碳汇能力。在持续加强化肥农药减施增效、面源污染防控、生物降解地膜应用和废旧农膜回收利用、农田节水灌溉等措施的同时，加快推进高标准农田建设和轮作休耕试点，积极推广秸秆还田、增施有机肥、化肥深施、少免耕保护性耕作、农机农艺融合等技术，持续提升耕地质量，培肥土壤。

（2）强化畜牧业源头减量、过程控制和末端处理。在逐步完善草场承包经营责任制，严格控制牛羊数量、严禁过牧超载现象的同时，通过优化日粮配方、推广瘤胃调节技术、改进圈舍环境控制和尾气统一收集设计、改进畜禽粪污处理装备、加强无害化处理、强化畜禽废弃物资源化利用、探索绿色种养循环新模式等措施，有效降低畜牧业碳排放。

（3）努力降低农业机械对石油的依赖。加强高效节能农机具研发设计、生物柴油研制和风能、太阳能利用技术攻关，优化农机具资源配置和购置补贴政策引导，积极组织构建农机社会化服务体系，力争使农用柴油的碳排放仍维持下降态势。

（4）有效推动农村清洁能源利用。大力发展以屋顶光伏为基础的农村新型能源系统；加强农村微电网改造，优先使用太阳能、风能、生物质能等清洁能源；整合农业生产多种用途的生物质能源利用系统，推动建立可持续的农村清洁能源体系，有效降低来自农业用电的碳排放。

（5）加大农业低碳技术的研发与应用。在省科技重大专项、重点研发计划等项目中设立农业碳中和研究专项，围绕六大特色产业提质增效、农业化学投入品减量/替代、合理耕层构建、秸秆还田、有机废弃物资源化利用等关键技术难题进行攻关，创建农业低碳技术和固碳减排模式。

参考文献（References）

[1] 黄润秋. 把碳达峰碳中和纳入生态文明建设整体布局[N]. 学习时报, 2021-11-17(001). [Huang Runqiu. Promote the goal of carbon peak and carbon neutralization as scheduled[N]. Learning Times, 2021-11-17(001).]

[2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[N]. 人民日报, 2020-09-23(001). [Xi Jinping. Speech on the 75th session of the United Nations general assembly[N]. People's Daily, 2020-09-23(001).]

[3] 田云, 张俊飚, 李波. 中国农业碳排放研究: 测算、时空比较及脱钩效应[J]. 资源科学, 2012, 34(11): 2097-2105. [Tian Yun, Zhang Junbiao, Li Bo. Agricultural carbon emissions in China: Calculation, spatial-temporal comparison and decoupling effects [J]. Resources Science, 2012, 34(11): 2097-2105.]

[4] 董红敏, 李玉娥, 陶秀萍, 等. 中国农业源温室气体排放与减排技术对策[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 269-273. [Dong Hongmin, Li Yu'e, Tao Xiuping, et al. China greenhouse gas emissions from agricultural activities and its mitigation strategy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(10): 269-273.]

[5] 张小平, 王龙飞. 甘肃省农业碳排放变化及影响因素分析[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1029-1035. [Zhang Xiaoping, Wang Longfei. Variations and influential factors of agricultural carbon emissions in Gansu Province[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5):

1029−1035.]

[6] 邱子健, 靳红梅, 高南, 等. 江苏省农业碳排放时序特征与趋势预测[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 658−669. [Qiu Zijian, Jin Hongmei, Gao Nan, et al. Temporal characteristics and trend prediction of agricultural carbon emission in Jiangsu Province, China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(3): 658−669.]

[7] Havlik P, Valin H, Herrero M, et al. Climate change mitigation through livestock system transitions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111 (10): 3709−3714.

[8] Luo Y S, Long X L, Wu C, et al. Decoupling CO_2 emissions from economic growth in agricultural sector across 30 Chinese provinces from 1997 to 2014[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 159: 220−228.

[9] Xiong C H, Chen S, Xu L T. Driving factors analysis of agricultural carbon emissions based on extended STIRPAT model of Jiangsu Province, China[J]. Growth and Change, 2020, 51(3): 1401−1416.

[10] Zhang J T, Tian H Q, Shi H, et al. Increased greenhouse gas emission intensity of major croplands in China: Implications for food security and climate change mitigation[J]. Global Change Biology, 2020, 26(11): 6116−6133.

[11] 田成诗, 陈雨. 中国省际农业碳排放测算及低碳化水平评价——基于衍生指标与TOPSIS法的运用[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 395−410. [Tian Chengshi, Chen Yu. China's provincial agricultural carbon emissions measurement and low carbonization level evaluation: Based on the application of derivative indicators and TOPSIS[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2): 395−410.]

[12] 陈红, 王浩坤, 秦帅. 农业碳排放的脱钩效应及驱动因素分析——以黑龙江省为例[J]. 科技管理研究, 2019, 39(17): 247−252. [Chen Hong, Wang Haokun, Qin Shuai. Analysis of decoupling effect and driving factors of agricultural carbon emission: A case study of Heilongjiang Province[J]. Science and Technology Management Research, 2019, 39(17): 247−252.]

[13] 蔡育蓉, 王立刚. 北方典型农业生态系统的固碳减排路径及模式[J]. 中国生态农业学报, 2022, 30(4): 641−650. [Cai Yurong, Wang Ligang. Carbon sequestration and greenhouse gas mitigation paths and modes in a typical agroecosystem in northern China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 641−650.]

[14] 夏文浩, 王铭扬, 姜磊. 新疆农业碳排放强度时空变化趋势与收敛分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1145−1154. [Xia Wenhao, Wang Mingyang, Jiang Lei. Spatiotemporal variation trends and convergence analysis of agricultural carbon emission intensity in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1145−1154.]

[15] 国家统计局农村社会经济调查司. 中国农村统计年鉴2021[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021. [Department of Rural Socio-Economic Survey, National Bureau of Statistics of China. China rural statistical yearbook 2021[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.]

[16] 刘明达, 蒙吉军, 刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理, 2014, 34(2): 248−258. [Liu Mingda, Meng Jijun, Liu Bihan. Research progress of carbon emission accounting methods at home and abroad[J]. Tropical Geography, 2014, 34(2): 248−258.]

[17] Aliyu G, Luo J, Di H, et al. Nitrous oxide emissions from China's croplands based on regional and crop-specific emission factors deviate from IPCC 2006 estimates[J]. Science of the Total Environment, 2019, 669: 547−558.

[18] Sook J E, Hak Y S, Back C S, et al. Application of 2006 IPCC guideline to improve greenhouse gas emission estimation for livestock agriculture[J]. Journal of Animal Environmental Science, 2012, 18(2): 75−84.

[19] Liu D, Xiao B. Can China achieve its carbon emission peaking? A scenario analysis based on STIRPAT and system dynamics model [J]. Ecological Indicators, 2018, 93: 647−657.

[20] Ehrlich P R, Holdren J P. Impact of population growth: Complacency concerning this component of man's predicament is unjustified and counterproductive[J]. Science, 1971, 171(3977): 1212−1217.

[21] 张乐勤, 陈素平, 王文琴, 等. 安徽省近15年建设用地变化对碳排放效应测度及趋势预测——基于STIRPAT模型[J]. 环境科学学报, 2013, 33(3): 950−958. [Zhang Leqin, Chen Suping, Wang Wenqin, et al. Measurement and trend analysis of carbon emissions from construction land changes in Anhui in the recent 15 years: Based on STIRPAT model[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(3): 950−958.]

[22] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: Analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. Ecological Economics, 2003, 46(3): 351−365.

[23] 黄晓慧, 杨飞. 碳达峰背景下中国农业碳排放测算及其时空动态演变[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(14): 232−239. [Huang Xiaohui, Yang Fei. Calculation and spatiotemporal dynamic evolution of agricultural carbon emissions in China under the background of carbon peak[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(14): 232−239.]

[24] 胡婉玲, 张金鑫, 王红玲. 中国种植业碳排放时空分异研究[J]. 统计与决策, 2020, 36(15): 92−95. [Hu Wanling, Zhang Jinxin, Wang Hongling. Research on the spatial and temporal variation of carbon emissions of China's planting industry[J]. Statistics and Decision, 2020, 36(15): 92−95.]

[25] 苏洋, 马惠兰, 李凤. 新疆农牧业碳排放及其与农业经济增长的脱钩关系研究[J]. 干旱区地理, 2014, 37(5): 1047−1054. [Su Yang, Ma Huilan, Li Feng. Xinjiang agriculture and animal husbandry carbon emissions and its decoupling relationship with agricultural economic growth[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(5): 1047−1054.]

[26] 方苗, 贺义雄, 余晓洋. 农业碳排放研究: 空间格局、脱钩效应及驱动因素——以浙江省为例[J]. 资源开发与市场, 2022, 38

(12): 1461-1467, 1528. [Fang Miao, He Yixiong, Yu Xiaoyang. Agricultural carbon emissions: Spatial pattern, decoupling effect and driving factors taking Zhejiang Province as an example[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(12): 1461-1467, 1528.]

[27] 桂河, 李静, 尚梦媛. "双碳"背景下的宁夏农业碳排放时序特征、驱动机理与脱钩效应研究[J]. 中南林业科技大学学报(社会科学版), 2021, 15(6): 37-44. [Gui He, Li Jing, Shang Mengyuan. Study on temporal characteristics, driving mechanism and decoupling effect of agricultural carbon emission in Ningxia under the background of "double carbon"[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology (Social Sciences Edition), 2021, 15(6): 37-44.]

Characteristics of agricultural carbon emissions in Gansu Province based on STIRPAT model

YANG Sicun, HUO Lin, WANG Chengbao, WEN Meijuan

(Institute of Soil, Fertilizer and Water-Saving Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences/Baiyin National Scientific Observing and Experimental Station of Agriculture, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study aimed to investigate aspects of the plant production and animal husbandry by employing the emission factor method to estimate agricultural carbon emissions and analyze their temporal and spatial variation features in Gansu Province, China, from 2000 to 2020. The factors influencing agricultural carbon emissions were investigated based on the stochastic impacts by regression on PAT (STIRPAT) model. Subsequently, corresponding countermeasures were proposed in this study. The results indicated the following: (1) The CO_2-e emissions from the agricultural sector of Gansu Province from 2000 to 2020 showed an increasing-decreasing-increasing trend; the emissions reached a peak in 2015, which was estimated to be 2320.41×10^4 t. Additionally, from 2018 onward, the emissions increased annually to 2290.69×10^4 t in 2020. (2) In Gansu Province's agricultural CO_2-e emission structure, the plant production accounted for 35% and animal husbandry accounted for 65% of the total emissions. Among the various carbon sources, livestock and poultry gastrointestinal fermentation contributed the most to total agricultural carbon emissions, followed by fertilizer and animal manure management. Among the major livestock and poultry, beef cattle farming contributed the most to agricultural carbon emissions. And then were sheep, goats, cows, and pigs farming, and poultry farming contributed the least to agricultural carbon emissions. (3) Rural population, per capita GDP, per capita disposable income of rural residents, total power of agricultural machinery, proportion of agricultural added value in the province's GDP, investment in fixed assets of rural households, application of agricultural scientific and technological achievements, and investment in agricultural science and technology were the main factors affecting agricultural carbon emissions in Gansu Province. The influence indices of these factors for agricultural carbon emissions were −0.017, 0.026, 0.020, 0.038, −0.025, 0.031, −0.017, and 0.016, respectively. To effectively control agricultural carbon emissions, appropriate strategies regarding the following should be adopted: improving the resource utilization efficiency of the plant production and soil carbon sequestration capacity industriously; strengthening the source reduction, process control, and end treatment of animal husbandry; reducing the dependence of farm machinery on oil to the maximum possible extent; promoting the use of clean energy in rural areas effectively; and increasing the research, development, and application of low-carbon agricultural technologies.

Key words: agricultural carbon emissions; STIRPAT model; plant production; animal husbandry; Gansu Province